

## 半導体レーザを用いた三角測量法による 高速三次元計測に関する研究

### Study on high speed three-dimensional measurement by triangulation using semiconductor laser

高井 浩典<sup>†</sup>      津田 紀生<sup>††</sup>      山田 諄<sup>††</sup>

Hironori TAKAI      Norio TSUDA      Jun YAMADA

**Abstract:** In industry, non-contact three dimensional measurements in processes is one of the important demand. Equipments with CCD camera have genellaly been used. But the measurement speed is slow and cost is high. The three dimensional measurement devices based on laser triangulation have been developed. The device consists of a semiconductor laser , poligon mirror and two dimensionalPSD. The signal from PSD is processed by an analog circuit , and the output wave- form is proportional to the cross sectional shape of objects. This device is able to measure the three-dimensional shape of object at high speed. It is a simple structure with low cost and, is suitable for in-process measurements.

#### 1. はじめに

近年、工場内の製造ライン過程に於いて長さや幅などの計測が行われており、ベルトコンベアー上を流れてくる物体の大きさや形状を、動きを阻害せずに非接触で測定する事は、産業分野で要求されている最も基本的なものの一つである。最近では、さらに製品の三次元形状計測が重要になってきており、現在は、CCD カメラを使った装置などがある。しかしそれらの三次元測定器は、物体を点で測定を行うため、膨大な量のデータをパソコンで情報処理を行う必要があり後処理に長時間を要し、一般に高速測定が困難である。さらに、2 台の CCD カメラを用いるなど構造が複雑になり、また、測定装置自体が高価になる等の欠点がある。

そこで我々は、一次元計測に広く用いられている三角測量法を用いて<sup>1)</sup>、二次元の光変位計を開発し、さらにそれを拡張することで三次元計測を可能にした<sup>2)</sup>。半導体レーザを用いた三角測量法による高速三次元計測は、半導体レーザ光を対象物に照射することによって生ずる対象物上の光点の位置を半導体位置検出素子(PSD)によって測定し、測定によって得られた情報より三角測量法の原理に基づいて対象物までの距離、対象物の変位を算出するものである。これにより、現在の三次元計測器の欠点を解消し、対象物の動きなどを阻害せずに非接触で測定する事が可能で、構造がシンプル、信号処理が容易であるので、工場内のインプロセス計測が可能である。

#### 2. 三次元計測の測定原理

本研究に用いた三次元測定の原理について説明する。

図 1 は測定原理を説明するための概略図である。まず投光器の半導体レーザから発振したレーザ光を、微小単レンズで平行な光ビームに変換し、ポリゴンミラーの上方から照射する。その後ポリゴンミラーにより 120° の角度で扇形に前方へ走査し、投光レンズにより Z 軸に平行で X 軸上を平行走査する光に変換され測定物に照射する。説明のために、レーザの光軸方向を Z 軸方向、レーザ光の走査方向を X 軸方向、両軸に対して垂直な方向を Y 軸方向とする。測定物は Y-Z 軸方向に移動可能なステージ上に垂直に取り付けられた試料台の上に固定してある。照射された光は測定物表面で散乱し、散乱光の一部は受光レンズにより PSD の受光表面上に集光される。その後、後段の演算回路によって演算処理を行い測定物のそのままの二次元波形が得られる。そして、ステージを Y 軸方向に一定区間ごと移動し、測定物の二次元計測を繰り返し行い、測定して得られた波形を並べ一つにまとめると測定物の三次元形状を得る事ができる。

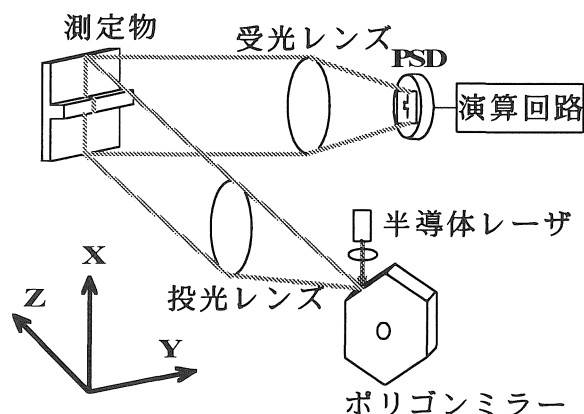


図 1 三次元測定原理図

<sup>†</sup> 愛知工業大学大学院工学研究科  
電気電子工学専攻 (豊田市)

<sup>††</sup> 愛知工業大学電子工学科 (豊田市)

### 3. 三次元測定システム

三角測量法の原理に基づいて三次元測定装置の製作及び評価を行った。今回、製作した測定システムは、測定装置、直流安定化電源、移動ステージ、デジタルオシロスコープ、パソコンで構成されている。ステージは、GP-IB でパソコンに接続され、制御されている。

#### 3. 1 単レンズを用いた測定装置

最初に簡単な光学系で構成した受光レンズに単レンズを用いた測定装置を図 2 に示す。

投光器は出力 3mW、発振波長 780nm の半導体レーザーと焦点距離 5mm、直径 5mm の単レンズ、ポリゴンミラーで構成した。今回は、明るい部屋の中でも三次元測定を可能にするため、半導体レーザーを 5.5MHz で方形波変調して使用した。ポリゴンミラーは、多面体の回転ミラーであり、レーザー光を高速で走査する用途に用いられる。今回はミラー面が六面で直径 44mm、ミラー面  $2 \times 22\text{mm}$ 、回転速度が 1000rpm であるものを使用した。投光レンズは焦点距離 81.5mm 直径 50mm、受光レンズは焦点距離 30mm 直径 30mm を使用した。受光器は有効受光面積  $4\text{mm} \times 4\text{mm}$ 、位置検出誤差  $\pm 12\mu\text{m}$  の改良表面分割型二次元 PSD と演算回路で構成した。また、本装置はサイズ  $200\text{mm} \times 260\text{mm}$  の小型ボックスの中に収めた。

また点 O は、投光レンズの焦点であり三次元測定の基準点である。

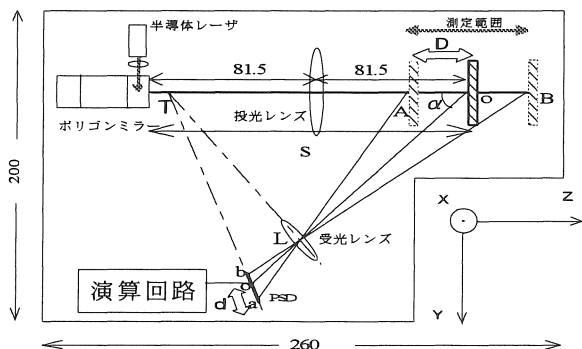


図 2 受光レンズに単レンズを用いた測定装置

#### 3. 2 シリンドリカルレンズを用いた測定装置

単レンズを用いた装置は、Z 軸、X 軸とも同程度の物体は精度よく測定できるが、板状の物体の厚みはあまり精度良く測定できない。そこで、Z 軸、X 軸方向に別々に集光させるように、焦点距離が異なった二つのシリンドリカルレンズを用いた。

測定装置の概略図を図 3 に示す。Z 軸方向の測定精度を X 軸より向上するために、受光側に直交した 2 枚のシリンドリカルレンズ  $L_1$ 、 $L_2$  を用いた。 $L_1$  で Z 軸方向を、 $L_2$  で X 軸方向をそれぞれ集光させる。

図 4 に上から見た測定装置を示す。 $L_1$  のレンズ面積が小さいので受光レンズに単レンズを用いた LD より出力の高い 20mW の LD を使用した。ポリゴンミラーと投光レンズは、単レンズで用いた装置と同じである。シリンドリカルレンズの大きさは、 $L_1$  が  $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ 、焦点距離:40mm、 $L_2$  が  $20\text{mm} \times 30\text{mm}$ 、焦点距離:30mm である。PSD 受光面と  $L_1$  の光軸との交点をレーザーの光軸で一致する、シャインブルーグの条件を満たすように設計してあるので、レーザー光の光軸上の全ての Z 軸上の点が  $L_1$  により PSD 受光面に結像される。しかし、この Z 軸上の測定範囲と PSD 受光面に対してシャインブルーグの条件を満たす位置は一箇所しかなく、Z 軸方向の光を結像する  $L_1$  をその位置に配置すると  $L_2$  は X 軸方向の光を完全に結像することができなくなる。そこで  $L_2$  は、 $L_1$  と平行で PSD 受光面においてスポット径が最小になる位置に配置した。

このように、二枚のシリンドリカルレンズを用いればそれぞれの方向において、異なった倍率で測定することが可能である。

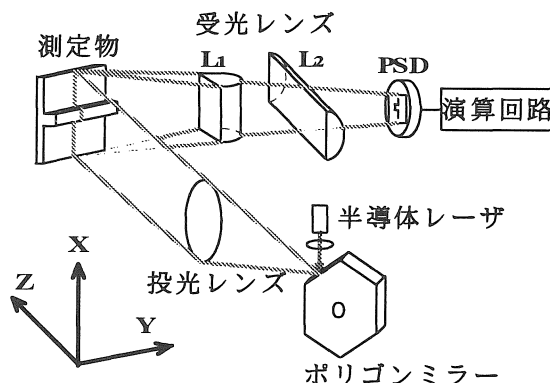


図 3 受光レンズにシリンドリカルレンズを用いた装置の原理図

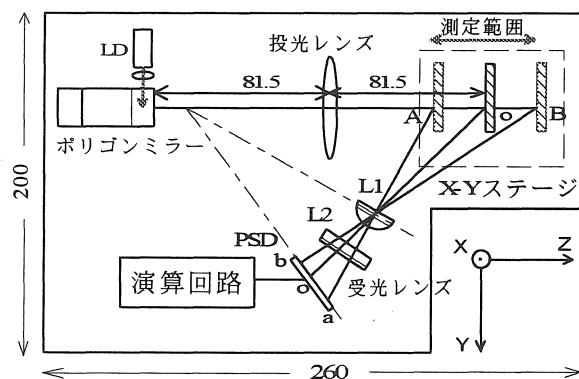


図 4 受光レンズにシリンドリカルレンズを用いた装置図

#### 3. 3 PSD と演算回路

PSD はシリコンフォトダイオードを利用した光スポットの位置検出用センサである。この素子は入射したス

ポット状の光の位置を検出でき、いろいろな光源と組み合わせでポジションセンサとして広く応用されている。今回は二次元で位置検出を行うことができる改良表面分割型二次元 PSD を用いた。

図5のように PSD の二本の電極から出力される微弱な信号を増幅し、変調波のみを通過させるバンドパスフィルタ (BPF) を通し、積分、加算、減算、割り算回路に通す。増幅回路のアンプゲインは 80dB で積分回路の時定数は  $4.7\mu s$  である。X 軸の二本の電極にも Z 軸と同様の回路を付けることもできるが、X 軸方向の変位は、ポリゴンミラーの回転速度と試料面における LD の照射時間から計算でき、誤差が少ないので付けずに測定した。このブロック図では最終段階に於いて全受光量で割り算を行っているため、PSD へ入射する入射光強度に関係ない測定物の二次元断面波形を得ることができる。また、画像処理などの複雑な後処理を全く必要とせず高速で測定することができる。

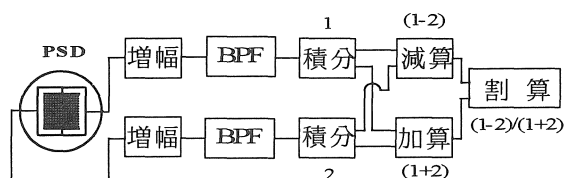


図5 PSDと演算回路

#### 4. 測定結果及び考察

##### 4. 1 単レンズを用いた測定装置

##### 4. 1. 1 Z 軸方向校正曲線

三次元測定の前に、演算回路の出力電圧から、Z 軸方向の変位を求めるために校正曲線を作成した。測定は、X-Y ステージに垂直に取り付けた試料台の上に散乱光量の多い白色の紙をたるまないように張り付け、X-Y ステージを Z 軸方向に 1mm ずつ投光レンズから遠ざかる方向に移動させ、PSD に反射光が入射し始めてから、測定範囲からはずれるまでその出力電圧を繰り返し測定した。図6に7回測定し平均した結果を示す。

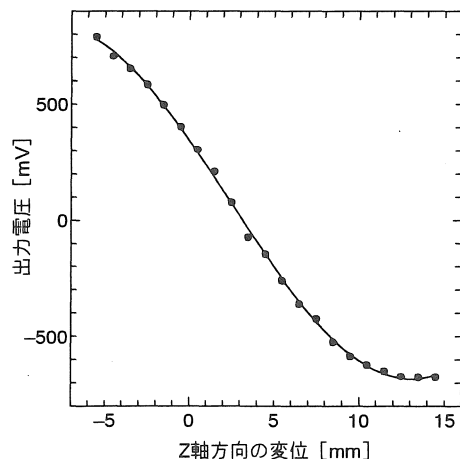


図6 Z 軸方向校正曲線

図6の横軸における0は投光レンズの焦点であり、投光レンズ側は“-”で表している。図6において“-5mmから+10mm”の直線的に変化している範囲内で、三次元計測を行えば、出力電圧がZ方向の位置に比例しているので、後処理を必要とせず高速測定が可能である。このグラフによりZ軸方向のバラツキは、校正曲線の直線的に変化している範囲において平均のバラツキ誤差は、約  $70\mu m$  である事が分かった。

##### 4. 1. 2 X 軸方向校正曲線

X 軸方向のバラツキ誤差を測定するための校正曲線を作成した。測定は、Z 軸校正曲線で使用した試料台の上に厚紙を張り付け、出力波形に段差を作り、ステージを X 軸方向に 1mm 間隔ごと移動させ、段差までの時間を測定した。この結果を図7に示す。図7より、X 軸方向の位置に対してポリゴンミラーによる LD の走査時間が直線的に変化していることが分かる。また、ステージの取り付け位置を変えることで求めた、X 軸方向の測定可能範囲は、50mm である事が分かった。三次元測定において、X 軸方向の変位は、LD の走査時間とポリゴンミラーの回転速度から求める。

また、校正曲線の平均から求めたバラツキの平均誤差は Z 軸方向と同様に約  $70\mu m$  となった。

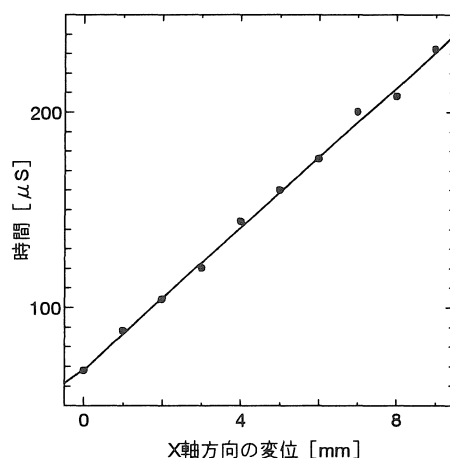


図7 X 軸方向校正曲線

##### 4. 1. 3 三次元測定結果

図8は三角形に加工した厚さ 1mm の紙を三次元計測装置で測定した結果である。測定は、演算回路から出力される測定物の 2 次元の断面波形をオシロスコープで取り込み 16 回平均し、ステージを Y 軸方向に 1mm ずつ移動させて行った。これより、三角形の物体が分かる。オシロスコープで 16 回平均すると、平均しない場合と比べて出力波形のノイズ成分が 8 分の 1 に減少した。実測値との誤差は、 $150\mu m$  程度あるが、一本一本の波形の平均のバラツキを距離に換算すると  $30\mu m$  程度である。

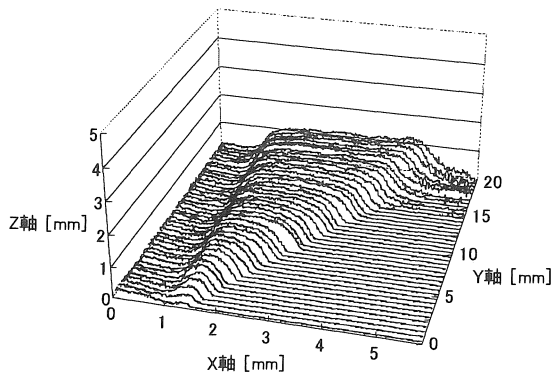


図 8. 三角形に加工した厚紙

#### 4. 2 シリンドリカルレンズを用いた装置

##### 4. 2. 1 Z 軸方向校正曲線

単レンズを用いた装置と同様の方法で、Z 軸方向の校正曲線を作成した。試料は同じく白色の試料を用いた。8 回測定して平均した結果を図 9 に示す。図中の  $-3\text{mm} \sim 7\text{mm}$  の直線的に変化している範囲内で、三次元測定を行えば、一切の後処理なしで Z 軸方向の変位を求めることができる。バラツキの平均誤差は、 $35\mu\text{m}$  程度である。これは、単レンズを用いた装置と比較すると、誤差は約半分に減少している。また、Z 軸方向の測定範囲は、約  $10\text{mm}$  である。

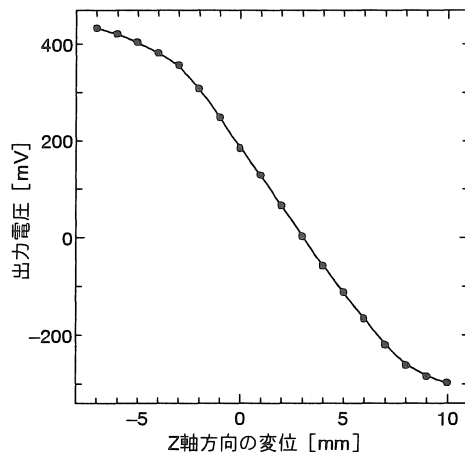


図 9 Z 軸方向校正曲線

##### 4. 2. 2 X 軸方向校正曲線

単レンズを用いた装置と同様に X 軸方向の校正曲線を作成した。図 10 に測定した結果を示す。測定を行った範囲に於ける平均のバラツキ誤差は、約  $45\mu\text{m}$  程度である。X 軸方向の誤差は、ポリゴンミラーの面ブレによる影響だけである。また、X 軸方向の測定可能範囲は、約  $47\text{mm}$  である。

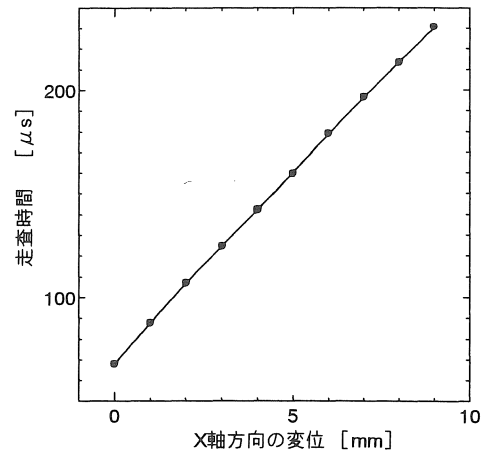


図 10 X 軸方向校正曲線

##### 4. 2. 3 色別による出力電圧の差

図 11 に測定物として色々な色の色紙を用いた時の出力電圧を Z 軸方向の変位の関数として示す。平均のバラツキ誤差は、黄色： $85\mu\text{m}$ 、赤色： $130\mu\text{m}$ 、青色： $180\mu\text{m}$  あるが、投光レンズの焦点付近におけるバラツキ誤差は、黄色が約  $50\mu\text{m}$ 、赤色が  $77\mu\text{m}$ 、青色が  $90\mu\text{m}$  程度である。

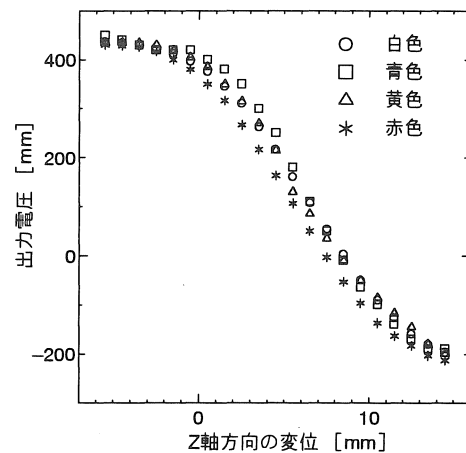


図 11 色別の出力電圧の差

##### 4. 2. 4 ドリフト特性

図 12 に時間変化における、ドリフト特性のグラフを示す。測定は、測定物を固定したまま電源投入後の出力波形の電圧変化を 10 分ごとに 1 時間測定した。グラフに示した点線は校正曲線より得た測定点に於ける基準の出力電圧である。出力電圧は約 20 分で安定し、バラツキ誤差は、約  $5\mu\text{m}$  程度に収まっている。

図 13 に X 軸方向のドリフト特性を示す。測定は、試料台に厚紙を貼り付け、経過時間に対する波形のズレを測定した。点線は、校正曲線より得た測定点の X 軸方向の時間である。グラフより、出力電圧は、5 分後に安定

しバラツキ誤差は、 $0.5\text{mV}$  以内に収まっている。バラツキの平均誤差は、 $5\mu\text{m}$  である。X 軸方向の誤差は、ポリゴンミラーの回転ムラと面ブレによる影響だけであるので6面あるミラーの1面だけで測定すれば、誤差は非常に小さくなる。

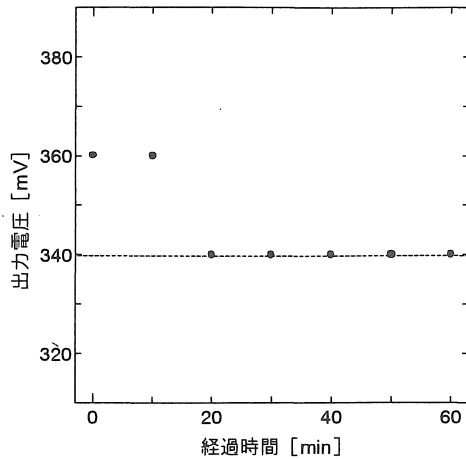


図12 Z軸方向ドリフト特性

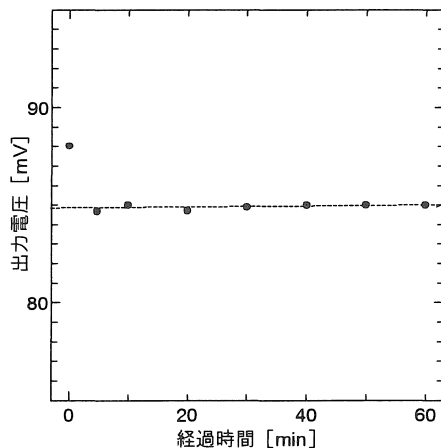


図13 X軸方向校正曲線

#### 4. 2. 5 三次元測定結果

図14に厚さ4mmの板状のプラスチックを三次元測定し、陰線処理した結果を示す。測定は、単レンズを用いた装置と同様に、試料台を投光レンズの焦点に配置し、Z軸方向校正曲線の直線範囲内で測定した。実測値との誤差は、 $100\mu\text{m}$  である。また、波形のバラツキを距離に換算すると約  $20\mu\text{m}$  程度である。

同様に、図15に厚紙をアルファベットのHの形の試料を測定し、陰線処理した結果を示す。このように、本測定器を用いれば写真などとは違い、物体の形状だけでなく各部の寸法まで分かる。

受光レンズにシリンドリカルレンズを用いた装置は、単レンズを用いた装置と比べ測定範囲は狭いが、板状の材料の厚み方向の誤差は少ない。

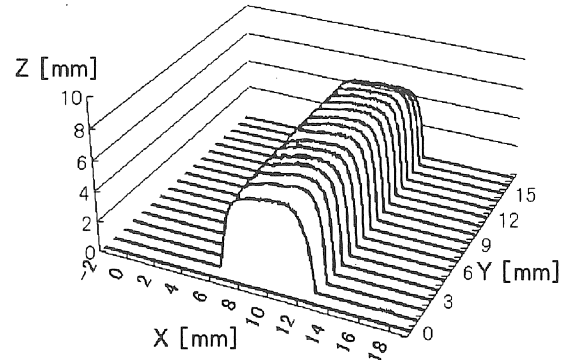


図14 板状のプラスチック

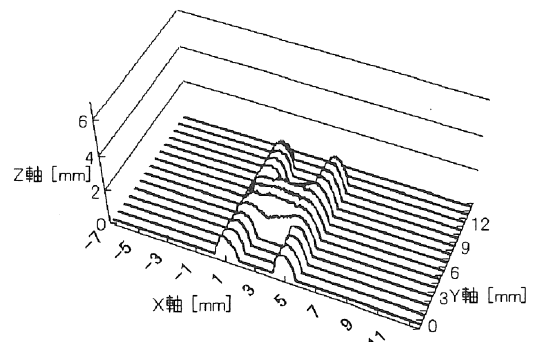


図15 Hに加工した厚紙

#### 5. まとめ

工場内におけるインプロセス計測を目指し、構造が簡単で、測定スピードが速く、非接触計測で信号処理が可能な三次元測定器を製作した。また、LDを変調しているので外乱光の影響を受けることなく明るい部屋でも測定可能である。

本測定器を用いて三次元測定をすれば、演算回路から出力される波形が、測定物のそのままの二次元断面波形が出力されるので高速測定が可能である。また、Y軸方向はステージの移動方向であり無限に測定が可能であるので、Z軸方向、X軸方向の測定範囲を満たしているならば、工場内においてベルトコンベアー上を流れてくる物体を高速で測定することができる。

三次元測定した結果において、波形の両端がなまっているのは、PSD受光面上のスポット径が有限であるためである。より複雑な物体を測定する時には正確に光軸を調節してPSD上のスポット径を小さくする必要がある。さらに、厚みが薄い物体や複雑な形状をした測定物になるとノイズに埋もれてしまいうまく測定できなかった。これは、よりS/Nの良いICを用いるなど演算回路の改良が必要である。

また、PSDから見て影になる部分は測定不可能である

ので、測定物の形状が分かっているときは測定物の配置に気を付けなければならない。しかし、受光レンズと二次元 PSD をもう一对、設置されている場所の反対側に対称に置いて、両方向から測定すれば、受光レンズに対して影になる部分が減少し、物体の表面全体の形状を計測することができる。

本研究は、最初に受光レンズに単レンズを用いて三次元測定動作を確認した。しかし、単レンズを用いると Z 軸方向、X 軸方向とも同程度の物体は、精度良く測定できるが、板状の物体の厚み方向は精度良く測定する事ができない。そこで、シリンドリカルレンズを用いて Z 軸方向、X 軸方向を異なる倍率で集光することで精度の向上を試みた。

受光レンズにシリンドリカルレンズを用いた装置は、X 軸方向の測定範囲はそのまま、Z 軸方向の測定範囲だけを狭くして精度を上げて測定することができた。測定器を製作し、物体を三次元測定すると単レンズを用いた装置と比べて測定物の厚み方向の精度が向上した。

#### 参考文献

- 1) レーザハンドブック レーザ学会 オーム社
- 2) 山王 祐登、山田 諄、内田 悦行、古橋 秀夫： 走査平行ビームを用いた三次元計測  
レーザ研究、Vol.22, No.12 December(1994) 別刷  
(受理 平成 13 年 3 月 19 日)